

# 橋の耐震性能評価技術の向上と津波の影響への対応

星隈 順一\*

## 1. はじめに

我が国における橋梁の耐震設計技術は、過去の大地震における様々な被災経験を踏まえながら研究開発が進められてきており、このような震災経験から得られた教訓は、設計基準の改定等を通じて、新規に設計する橋へとフィードバックされるとともに、既設橋に対しては、落橋や倒壊等の致命的な被害を受けた経験のある構造から優先に、順次耐震補強が進められてきているところである。

2011年東北地方太平洋沖地震では、広い範囲で強い揺れが観測されたが、過去の震災で被災経験のある構造条件のRC橋脚において過去の震災と同様な被害が生じた一方で、耐震補強されていた橋においては機能の回復が速やかに果たせる等、性能の観点からも耐震補強の効果が確認されたところである<sup>1)</sup>。

その一方で、東海地震、東南海地震、南海地震等の大規模地震の発生も逼迫していることが指摘されており、構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)では、技術相談等を通じて把握する現場のニーズを踏まえつつ、図-1に例示するように、既設橋への対応をも視野に入れた耐震性能の評価技術に関する様々な研究を進めてきていると

ころである。さらに、この他にも、2011年東北地方太平洋沖地震以降は、津波の影響に対する橋の評価技術に関する研究にも重点を置いて研究を行っている。

そこで、本稿では、道路橋の耐震性能の評価や津波の影響に対する対応等に関して、CAESARにおいてこれまでに取り組んできている研究開発等について紹介するとともに、今後の研究の方向性についてまとめた。

## 2. 道路橋の耐震性能評価技術の向上に向けた研究

### 2.1 既往の地震による道路橋の被災経験の分析

CAESARでは、我が国で発生した1891年濃尾地震から2008年岩手・宮城内陸地震までの間の地震によって橋が落橋し致命的な被害に至った事例を全て収集し、その落橋シナリオの分析を行っている<sup>2)</sup>。詳細については参考文献2)を参照いただきたいが、その結果、橋の落橋は下部構造の倒壊によって生じた事例が最も多く、橋数ベースで全体の43%、径間数ベースで全体の77%を占めている。次いで、地盤の変状等により下部構造自体が移動した結果落橋したケース、支承が損傷し桁が下部構造から逸脱して落橋したケースとなっている。

ここで、過去の震災で地震動により落橋・倒壊につながった橋の構造条件を整理すると、橋脚の倒壊事例で見ると、昭和55年道路橋示方書よりも古い基準を適用して設計された橋脚のうち、段落し部のあるRC単柱橋脚、壁式橋脚・ラーメン橋脚で連続橋の固定橋脚及び鋼製単柱橋脚が挙げられる。また、これら以外にも、両端が橋台でない単純桁、ゲルバー桁、パイルベント橋脚・基礎、液状化または流動化のおそれのある地盤にあり、かつ、支持層に達していない基礎を有する橋においても橋桁の落下に至る被災事例がある。一方、過去の震災経験からは、落橋や倒壊には至っていないものの大がかりな補修を要するような損傷が生じるおそれのある橋の構造条件として、昭和

	新設橋	既設橋
上部構造	特殊橋上部構造部材の地震時限界状態の評価	制震装置を用いた特殊橋の地震応答評価
支承部	ゴム支承、制震装置の性能評価試験方法	変状が生じたゴム支承の診断技術
落橋防止システム	震災経験に基づく落橋防止構造の要件分析	
橋脚	地震時限界状態の評価技術 配筋の合理化	震災経験に基づく耐震補強効果の検証 橋脚躯体、橋座部の応急復旧技術 耐震補強部位の耐久性の検証
橋台	地震時土圧の評価 新形式構造(軽量盛土、補強土壁)	
基礎		既設基礎の耐震性判定技術 動的解析による基礎の耐震照査技術 液状化判定手法の高度化

図-1 耐震性能の評価技術に関する最近の主な研究課題

Research on evaluation of seismic performance of bridges and tsunami-induced effect on bridges conducted by CAESAR

55年道路橋示方書よりも古い基準を適用した曲げ破壊型のRC橋脚、頂版とケーソン本体の接合が不十分なケーソン基礎、液状化のおそれのある地盤や軟弱地盤にある既製コンクリート杭を有する橋等を挙げる事ができる。

なお、最近の地震被害として、2008年岩手・宮城内陸地震では、下部構造の周辺地盤において地震により地すべりが発生し、その地すべりに伴って下部構造が大きく移動して落橋に至る被害が生じた事例がある<sup>3)</sup>。また、2011年東北地方太平洋沖地震では、津波により橋桁が流出する被害が多数発生したところである<sup>4)</sup>。いずれも、構造物の振動によって生じた落橋事例ではないが、橋としての機能を喪失するという観点では致命的な被害に変わりはない。CAESARでは、このような震災経験を踏まえ、橋の耐震性能に影響を及ぼすような地すべりとその予測技術さらにはそのような地すべりの予測に必要な地形地質の調査技術、また、本稿で後述する津波の影響に対する橋の評価技術の研究にも取り組んでいるところである。

## 2.2 性能に基づく部材の地震時限界状態の評価

大地震に対する橋の耐震設計では、部材のエネルギー吸収能を考慮して耐震性能を照査することが一般的である。このようなエネルギー吸収能を期待して耐震設計される部材については、地震による当該部材の損傷が橋全体系の耐震性能に直接的に影響を及ぼすため、その抵抗特性やエネルギー吸収能、最終的な破壊形態を実験等により把握した上で、目標とする耐震性能を確保できるように当該部材の限界状態を適切に設定する必要がある。

一般に、エネルギー吸収能を期待する部材としてRC橋脚が選定される場合が多いが、正負交番荷重下におけるRC橋脚の耐力や塑性変形能に関する研究は、土木研究所では昭和50年代からの長い歴史を持っており、これまでに、設計地震動の見直しと併せて、その成果は地震時保有水平耐力法や耐震補強工法の開発に大きく貢献してきた。最近では、正負交番荷重下における軸方向鉄筋のはらみだし挙動に基づいた新しい塑性ヒンジ長の評価式の提案<sup>5)</sup>や、この塑性ヒンジ長を用いたRC橋脚の地震時限界状態の評価手法の提案<sup>6)</sup>を行い、平成24年道路橋示方書<sup>7)</sup>に反映された。

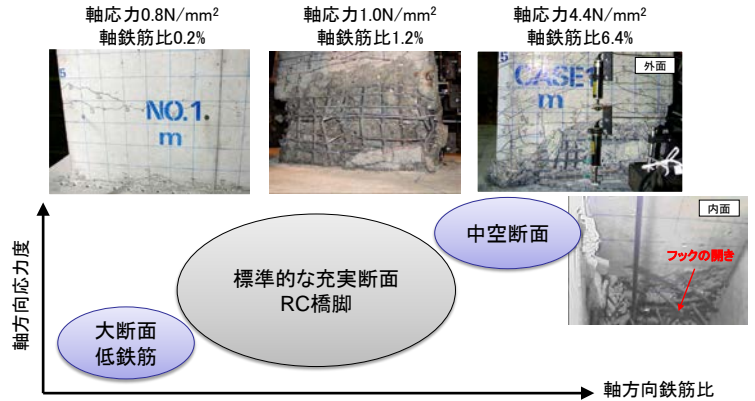


図-2 RC橋脚の構造条件と最終的な破壊形態

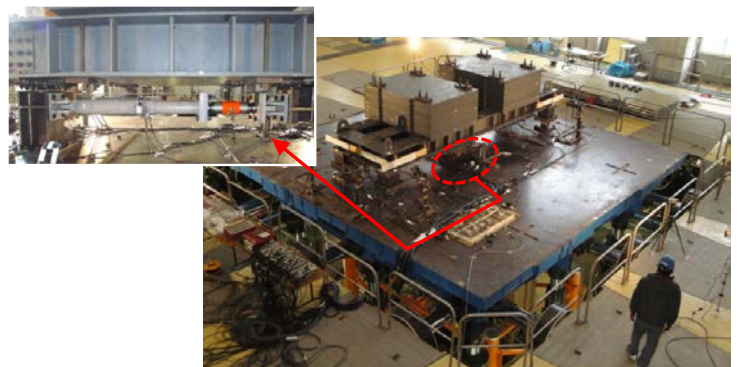


写真-1 三次元大型振動台による制震装置の性能評価

また、古い既設橋に多い大断面で低軸方向鉄筋比のRC橋脚や、逆に比較的新しい橋で採用されている高軸応力下で高軸方向鉄筋比の薄肉RC中空断面橋脚のような構造条件に対する地震時限界状態の評価手法についても研究を行っている<sup>8),9)</sup>。図-2に示すように、大断面で低軸方向鉄筋比のRC橋脚では外観から見た損傷はひびわれだけであっても、軸方向鉄筋が破断して水平耐力が低下した破壊状態となっていることがあること、薄肉RC中空断面橋脚では、外面側のコンクリートだけでなく補修が困難な内面側にも損傷が生じて破壊に至る場合があること等の知見が得られている。いずれの構造条件とも、多くの試験データがある軸方向鉄筋比が標準的なRC充実断面橋脚とは異なる破壊形態であり、RC橋脚の地震時限界状態の設定とその評価においては、このような特殊な構造条件下では破壊特性が変わってくる可能性があることに留意する必要がある。

## 2.3 免震技術や制震技術等の新しい技術を適切に活用していくための取組み

免震支承や制震装置は、橋の地震時挙動を制御する重要な部材であり、地震時に確実にその機能

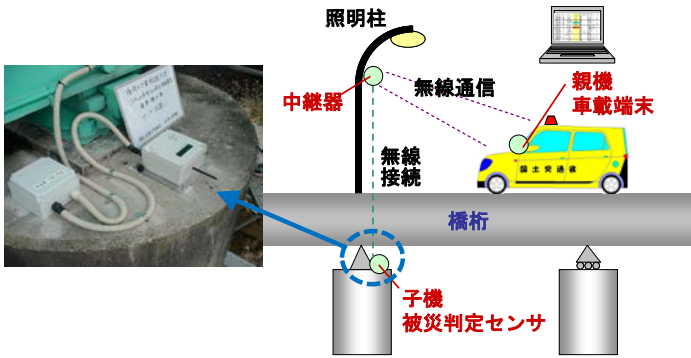


図-3 橋脚天端に設置した記憶型検知センサーによる地震被害予測システム

(a) 繊維バンドの巻立て

(b) 載荷実験による検証



写真-2 CAESARで研究開発した機械式定着繊維バンドによるRC橋脚の応急復旧技術

を發揮することが求められる。これらの免震支承や制震装置としては、様々な技術開発がなされており、これらの技術の適用にあたっては、その力学特性を適切に橋の耐震設計に反映させる必要がある。そこで、CAESARでは、免震支承や制震装置側に求める性能とその性能検証法の開発を目的として民間との共同研究を行い、橋側から見たニーズに沿った技術開発が促されるように取り組んできている(写真-1)<sup>10)</sup>。

## 2.4 地震被災度判定センサーやRC橋脚の応急復旧技術の開発

橋としての機能を速やかに回復できる耐震性能を確保する観点からは、地震後の点検により被害状況の把握を迅速に行えることが重要となる。図-3は、CAESARで研究開発を行った地震による橋脚の損傷をセンサーによって検知して自動伝送するシステムの概念図を示したものである<sup>11)</sup>。地震による被害は同時多発的に広範に生じることが考えられるが、特に地震により損傷が想定される部位が速やかに視認しにくい箇所にある場合や地震発生が夜間の場合には、被害の有無の確認に時間を要する場合があります。場合によっては、速やかな機能回復という性能に直接影響してくる可能性もある。このため、橋としての機能を速やかに回

復できる耐震性能の確保を補完するソフト的な技術の一つとして、このようなセンサー技術の活用が期待される。なお、本技術は、2011年東北地方太平洋沖地震において被災した橋梁のその後の余震に対する監視目的としても適用されている。

また、機能回復を速やかにする観点からは、損傷が生じて速やかに応急復旧できる技術を予め検討しておくことも重要である。応急復旧は、損傷が生じている部位とその程度によって様々な工法がある<sup>12)</sup>。しかしながら、地震後という状況下において速やかに応急復旧工事を実施するには、資材調達や現場へのアクセス等、様々な制約条件が生じる場合もある。このため、想定される被害形態に応じて、応急復旧効果だけでなく、施工性、迅速性、資材の備蓄性等を踏まえた応急復旧工法を予め検討しておくことも、機能回復を速やかにする耐震性能を確保する観点からは意義のある考え方である。CAESARでは、このような視点から、既設橋のRC橋脚の柱躯体部に生じる損傷を対象として、写真-2のような機械式定着繊維バンドによる応急復旧技術の研究開発を行った<sup>13)</sup>。また、既往の被災経験では、低鉄筋な壁式タイプの橋脚の橋座部(支承が取り付けられている橋脚頂部)で支承から伝達される地震力によってせん断損傷が生じた事例があるが、そのような損傷に対応できるような応急復旧技術についても研究を行っているところである。

## 2.5 耐震設計上重要な部位の耐久性に関する臨床研究

我が国の道路橋では、厳しい交通需要や自然環境にさらされてきただけでなく、老朽化も始まっており、既設橋の健全性を評価し、維持管理・更新する技術の確立が求められているところである。耐震設計上重要な部位に経年劣化に伴う損傷が生じると、直接的に耐震性能の低下につながることになるため、耐震性能の持続的確保の観点から、今後この分野の研究に着手しておくことが重要であると考えている。

このような観点から、CAESARでは、厳しい塩害環境にある地域に存し、過去に耐震補強が実施されている実物の橋脚を対象として、現時点における耐震補強部位等の耐荷力特性を臨床試験的に検証し、耐震補強効果を持続していく上で重要

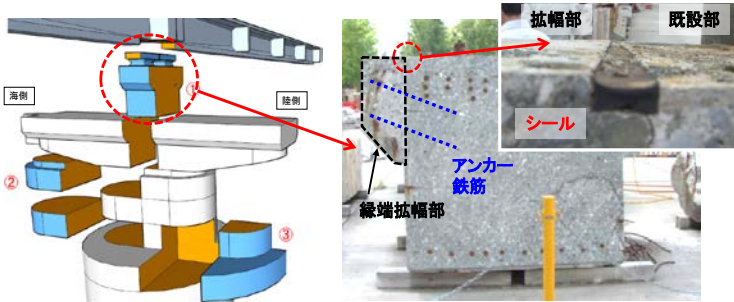


図-4 撤去部材を活用した耐震補強効果の持続性の検証

な事項について調査を行っている。その結果、例えば、桁かかり長の拡幅部の耐荷力を保持する上では、既設部と拡幅部のコンクリート境界面から水が浸入して内部のアンカー鉄筋に腐食が生じないように、境界部に耐久性のあるシールを適切に施すことが重要であること等が検証されている(図-4)<sup>14)</sup>。

また、支承部は橋の耐震性能を評価する上で重要な部材の一つであることから、その健全性を評価するための技術も今後求められてくると考えられる。特に、兵庫県南部地震以降、ゴム支承が多用されていることから、その経年変化の影響<sup>15)</sup>や維持管理の技術について、CAESARでも平成25年度から研究に着手したところである。

### 3. 津波が橋に及ぼす影響と対策に関する研究

#### 3.1 津波の特性を踏まえた実験的研究

津波による被災状況や既往の研究により、橋の架橋地点での津波の特性(水深、水位上昇速度、流速)によって橋に生じる挙動は大きく異なってくる事が明らかとなっている<sup>16)</sup>。そこで、CAESARでは、まず、橋の挙動メカニズムを把握することを目的として、このような津波特性が与えられた時に、橋がどのような挙動を示すのかについて、この種の実験としては最大規模の大型模型を用いた水路実験(写真-3)により検討を行うとともに、実験結果を再現するための解析手法に関する検証を行っている<sup>17)</sup>。ここでは、実験的な検討結果の一部を紹介する。

#### 3.2 段波状の津波が作用したときの橋の挙動

段波状の津波が作用したときの橋の挙動を対象として、上部構造の断面形状の違いが橋の挙動に与える影響について実験的に検討した結果の一例を図-5に示す。長方形断面では、床版張出部がな

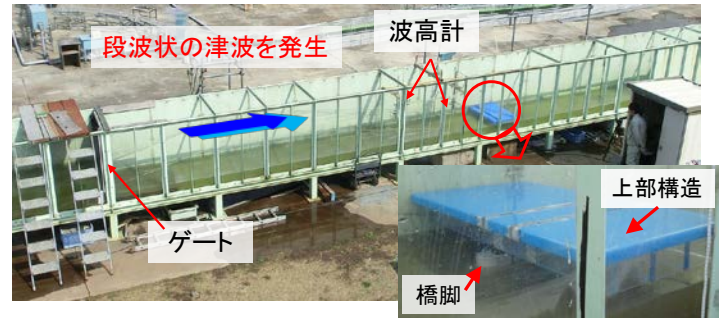


写真-3 1/20大型橋梁模型による水路実験

いために、上向きの圧力が発生せず、結果的に上部構造全体を押し下げるような挙動を示すこと、床版張出部が存在する断面では、張出部底面に津波からの圧力が作用し、その結果津波作用側の桁の支点部に上向きの力、反対側の支点部で下向きの力が作用し、津波作用側の床版が持ち上がるように回転するような挙動を示すこと等が明らかとなっている<sup>17)</sup>。また、上部構造に水の流れを受け流すための装置(フェアリング)を取り付けることにより、床版張出部底面に作用する上向きの圧力を受けなくなるため、支点部に作用する力も軽減する傾向となることを確認している<sup>18)</sup>。

この他にも、津波の流速が上部構造の挙動に及ぼす影響<sup>19)</sup>、隣接する側道橋が本線橋上部構造の津波作用時の挙動に及ぼす影響<sup>20)</sup>についても実験的な検討を行っており、挙動メカニズムの解明に資する諸データを得ている。

#### 3.3 水位が徐々に上昇する津波が作用したときの橋の挙動

橋の架橋地点において、津波により水位が徐々に上昇してくるような場合における橋に生じる挙動についても実験的な検証を実施した<sup>21)</sup>。

図-6は、水位上昇速度を0.1m/minとした場合における上部構造支点部の鉛直反力の経時変化を示したものである。水位上昇速度は東北地方太平洋沖地震において、津波が遡上した河川の水位上昇速度を参考にして設定したものである。また、図中には浮力の算定式から鉛直反力を計算した結果も示している。桁が浸水し始めると(0から15分)、徐々に鉛直支点反力が増加している。そして、桁が完全に水に没すると(15分以降)、鉛直支点反力は一定値になっている。また、実験値と数値計算値の間に、若干の差異があるが、浮力の式より算出した数値計算値とほぼ一致している。

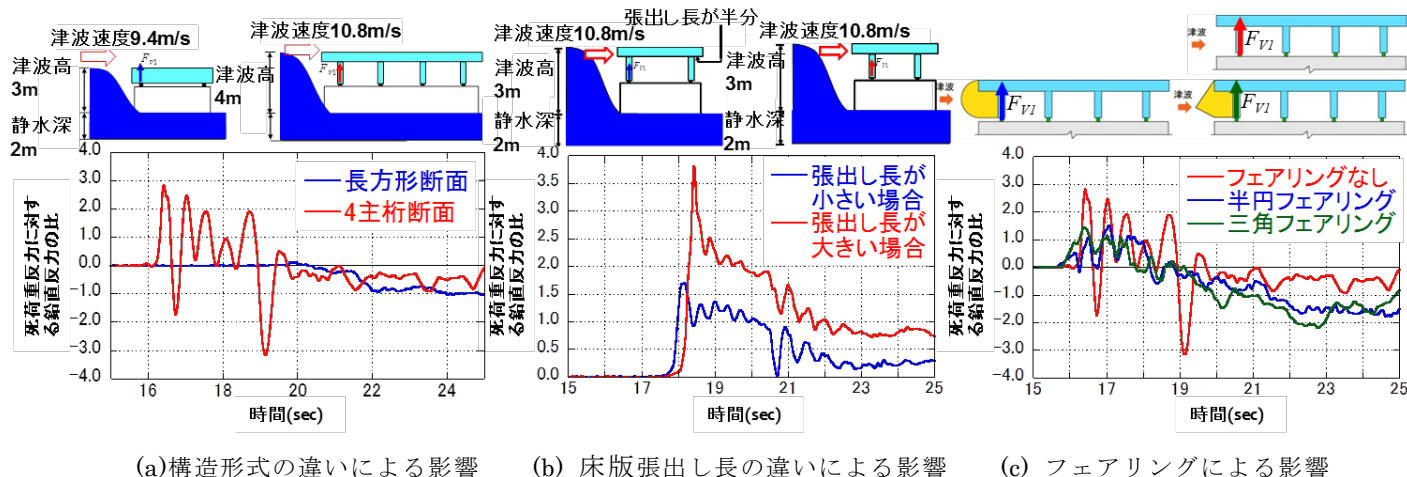


図-5 上部構造の断面特性が支承に生じる鉛直反力に及ぼす影響

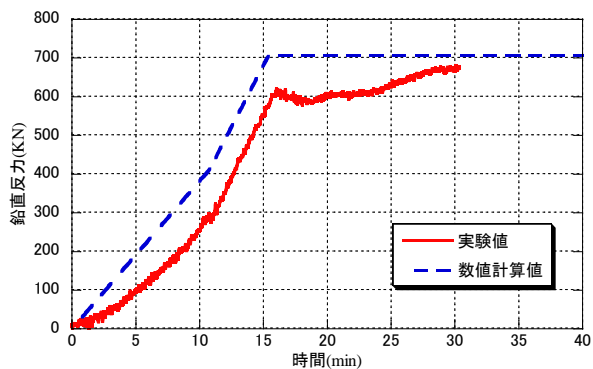


図-6 水位上昇により橋桁に作用する支点反力

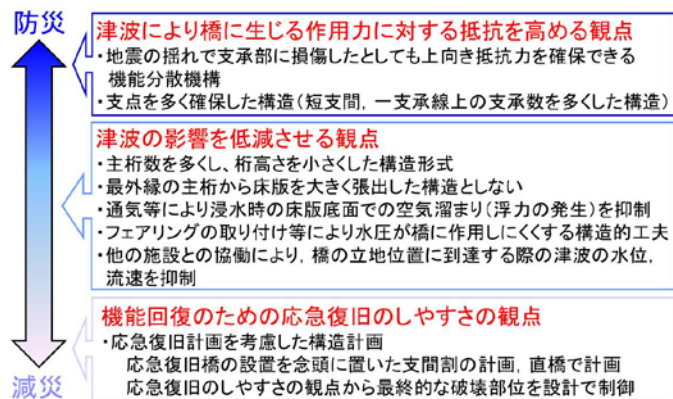


図-7 津波の影響を受ける一般的な桁橋における構造計画の考え方の提案

さらに、水位上昇速度を10倍にした場合の検証実験も実施しており、水位の上昇速度が支承部に生じる鉛直方向の反力に及ぼす影響は有意ではないことも確認している<sup>21)</sup>。

### 3.4 津波の影響を受ける桁橋における構造計画

これまでにCAESARで実施した実験的な検討結果の傾向、ならびに津波の作用によって支座位所に力が生まれるメカニズムをも踏まえ、津波の影響を受ける桁橋の構造計画に関する知見として、防災目的としての対策から減災目的としての配慮事項までを図-7のようにまとめた。

なお、引き続き、橋の立地位置で考慮する津波の特性に応じた橋に生じる挙動の評価手法について検討を進めているところである。

## 4. おわりに

道路橋の耐震設計に関する技術相談の内、その半数強は既設橋の耐震補強に関連した事項となっている。今後も、引き続き、震災経験を踏まえた合理的な優先度評価の下、的確な耐震補強の推進

に貢献できるよう、既設道路橋の耐震性能の評価技術の向上に努めていきたい。その際、これまでは地震により大きな被災が生じた橋の分析に力点が置かれてきたが、これからは強い地震動を受けたが耐震性能は確保できた橋の分析にも力点を置き、既設橋の耐震性能評価の観点から学び取ることができるといえる事項はないかという視点も含めて研究を進めたいと考えている。

また、津波の影響を受ける橋に関しては、定性的な構造計画の方向性は示したが、これまでの実験や解析により判明した橋の挙動メカニズム、さらには実際の津波により流出した橋と流出しなかった橋のデータも有効に活用してその評価手法を提案していきたいと考えている。このように津波の影響を受ける橋の挙動の評価手法が明示されていくことにより、今後産学分野で対策技術の開発も進展してくることも期待される。CAESAR では、これまでに免震技術や制震技術の分野において、民間の新しい技術を適切に橋の

耐震設計に適用していくための評価法について研究を実施してきているところであるが、津波に対する橋側の対策技術についても、今後産学とも連携しながら現場のニーズも踏まえた合理的な技術が生まれるよう研究を進めていきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 星隈順一、張広鋒、堺淳一：橋梁の耐震性の向上に向けて～東北地方太平洋沖地震における耐震補強された橋の挙動～、土木技術資料、第54巻、第1号、pp.8～11、2012.1.
- 2) 運上茂樹、星隈順一、堺淳一、植田健介：過去の大規模地震における落橋事例とその分析、土木研究所資料第4158号、2009.12.
- 3) 独立行政法人土木研究所：平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震被害調査報告、土木研究所資料第4120号、2008.12.
- 4) 国土技術政策総合研究所、独立行政法人土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震、土木施設災害調査速報、国総研資料第646号・土木研究所資料第4202号、2011.7.  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0646.htm>
- 5) 星隈順一、堺淳一、小森暢行：軸方向鉄筋の塑性座屈の再現解析に基づく鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長の推定手法に関する研究、土木研究所資料、第4257号、2013.3.
- 6) 星隈順一、堺淳一、小森暢行、坂柳皓文：鉄筋コンクリート橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究、土木研究所資料、第4262号、2013.3.
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2012.3.
- 8) 篠原聖二、末崎将司、堺淳一、星隈順一：低鉄筋比RC壁式橋脚の地震時破壊特性と耐力・変形能、第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.321～328、2013.7.
- 9) 八ツ元仁、堺淳一、星隈順一：高軸力を受ける高軸方向鉄筋比の中空断面RC橋脚の正負交番繰返し荷重下における破壊特性、土木学会論文集A1、Vol.69、No.2、pp.139～152、2013.
- 10) 独立行政法人土木研究所他：橋梁に用いる制震ダンパーの性能検証法及び設計法に関する共同研究報告書、共同研究報告書第438号、2012.3.
- 11) 堺淳一、運上茂樹：インテリジェントセンサを用いた橋梁地震被災度判定手法の開発に関する研究、土木研究所報告No.213、2009.3.
- 12) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧（震災復旧編）平成18年改訂版、2007.3.
- 13) 堺淳一、運上茂樹：地震により曲げ破壊した鉄筋コンクリート橋脚に対する緊急復旧工法の提案、地震工学論文集Vol.30、(社)土木学会、pp.306～316、2009.12.
- 14) 榎本武雄、篠原聖二、星隈順一：長期間塩害環境下に曝されたRC橋脚の耐震補強部材の耐荷特性、第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.457～464、2013.7.
- 15) 林訓裕、足立幸郎、甲元克明、八ツ元仁、五十嵐晃、党紀、東出知大：経年劣化したゴム支承(LRB)の残存性能に関する実験的考察、第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.449～456、2013.7.
- 16) 星隈順一、中尾尚史：津波により橋に生じる挙動のメカニズム、橋梁と基礎、Vol.47、No.8、2013.8.
- 17) 中尾尚史、張広鋒、炭村透、星隈順一：上部構造の断面特性が津波によって橋に生じる作用に及ぼす影響、土木学会論文集A1、Vol.69、No.4、pp.42～54、2013.
- 18) 炭村透、張広鋒、中尾尚史、星隈順一：津波により橋に生じる作用力に及ぼすフェアリングの影響、第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.429～434、2013.7.
- 19) 中尾尚史、張広鋒、炭村透、星隈順一：津波速度の違いが上部構造の挙動に与える影響に関する実験的研究、第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.421～428、2013.7.
- 20) 中尾尚史、張広鋒、炭村透、星隈順一：側道橋による津波作用時の橋の挙動に関する研究、第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.345～348、2013.7.
- 21) 中尾尚史、張広鋒、星隈順一：津波により上部構造の高さまで水位が上昇した時に橋に作用する浮力に関する研究、第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.151～154、2012.7.

星隈順一\*



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員、博(工)  
Dr. Jun-ichi HOSHIKUMA